引用格式：杨锐, 马英杰, 程世婧. 海洋观测探测平台关键材料发展与展望. 中国科学院院刊, 2022, 37(7): 881-887.
Yang R, Ma Y J, Cheng S J. Perspective on key materials for marine observation and exploration platform. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(7): 881-887. (in Chinese)

海洋观测探测平台关键材料发展与展望

杨 锐[1*] 马英杰[1] 程世婧[2]

1 中国科学院金属研究所 沈阳 110016

2 中国科学院 重大科技任务局 北京 100864

摘要 简要介绍了海洋观测探测平台用耐压结构材料和结构功能一体化材料的应用现状，论述了新材料对高性能海洋观测探测装备的支撑作用，指出对需求最多的上层水体观测探测装备而言降低材料成本是未来主要趋势。而对大型化、大深度观测探测装备仍需进一步解决影响性能提升的挑战性问题。对高效突破材料瓶颈的组织模式和研究重点提出了建议。

关键词 深海探测，耐压结构材料，浮力材料，照明材料，润滑密封材料

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20220429003

党的十八大以来，习近平总书记多次在讲话中谈及海洋强国建设，强调海洋事业关系民族生存发展状态，关系国家兴衰安危。党的十九大报告进一步指出，坚持陆海统筹，加快建设海洋强国。2022年4月，习近平总书记在海南考察时再次强调，建设海洋强国是实现中华民族伟大复兴的重大战略任务。要推动海洋科技实现高水平自立自强，加强原创性、引领性科技攻关，把装备制造牢牢抓在自己手里。建设海洋强国已成为实现中国梦的必然选择。海洋观测探测技术与装备是进入海洋、开发海洋的基础和保障[1]。“十三五”以来，在前期基础上，我国初步形成了以“奋斗者”号深海载人潜水器、“海斗”号全海深自主遥控水下机器人为突出代表的不同类型、覆盖全海深的谱系化海洋观测探测装备，为认知海洋提供了重要技术支撑与装备平台。

一代材料，一代装备，材料是装备的基石。多种类型的材料是支撑海洋观测探测装备“下得去、上得来、看得见”的基础，材料的性能直接影响装备的技术水平。新材料研发及应用一般要经历需求分析、原理验证、技术突破、应用验证等阶段，研发周期长、

*通信作者

资助项目：中国科学院战略性先导科技专项（A类）（XDA22010000）
修改稿收到日期：2022年4月28日

风险因素多，因此关键材料的研发需要根据技术应用趋势进行前瞻性布局，避免未来成为拖后腿的“短板”或被“卡脖子”。需要说明的是，本文所讨论的海洋观测探测材料限于与海水接触并受其压力作用与腐蚀影响的观测探测平台用结构材料和结构功能一体化材料，不涉及声学信号传递和传感器用功能材料。本文将首先介绍海洋观测探测材料的应用现状，涵盖金属结构材料（钢、钛）、非金属结构材料（高分子及其复合材料）、结构功能一体化材料（浮力材料、照明材料、密封及润滑材料）。随着海洋观测探测深度、广度及功能的拓展，装备平台对材料提出了更高综合要求。本文还将分析海洋观测探测新材料的发展趋势及挑战，并提出相关的发展建议。

1 海洋观探测材料应用现状

金属及非金属结构材料是耐海水压力的装备平台的“筋骨”，以承载为其主要特性。而浮力材料、照明材料、密封及润滑材料等结构功能一体化材料则除受海水压力影响外，还为海洋装备提供广义的功能属性。图 1 中展示了深海观测探测平台应用的关键材料及部件。

1.1 金属结构材料实现从钢到钛合金转变

目前海洋装备结构以钢、钛等金属材料为主，并以钢的应用最早。以载人深潜耐压壳体为例，20 世纪 60 年代，美国研制的 Sea Cliff 和 Alvin 潜水器的载人壳体均采用钢建造[2]。随着潜水器下潜深度增加导致海水压力增大，以及长期服役导致累积海水腐蚀的破坏作用增大，钢的比强度（强度/密度的比值）和耐腐蚀性能逐渐不适应结构设计的要求。钛及钛合金具有较高的比强度和优异的耐腐蚀性能，被称为“海洋金属”，是海洋工程制造领域理想的结构材料。美国 Sea Cliff 和 Alvin 潜水器的载人舱体在后期被逐步替换为钛合金。目前国际上主流载人潜水器载人舱基本采用 800 MPa 强度级别的 Ti-6Al-4V 钛合金，包括我国在“十一五”“十二五”期间研制的“蛟龙”号和“深海勇士”号载人潜水器。

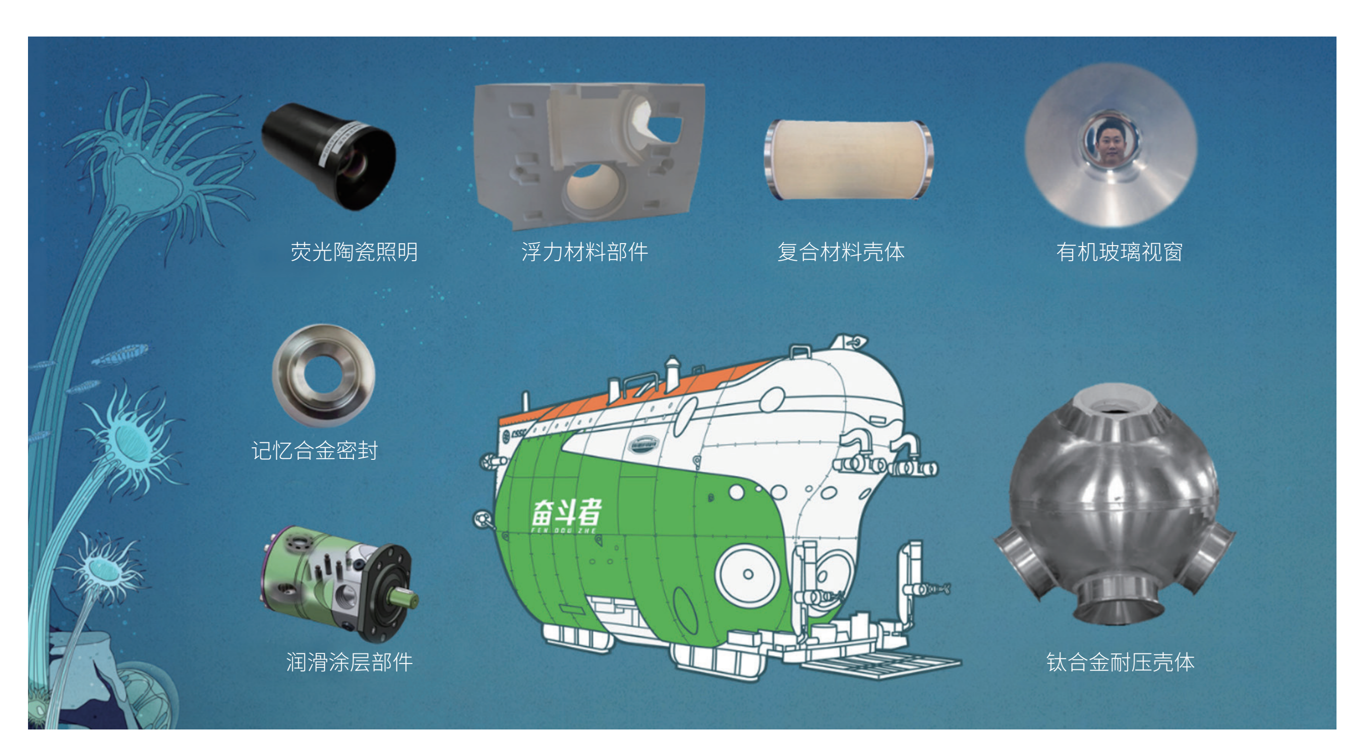


图 1　深海观测探测平台应用的主要材料及部件

Figure 1　Structural and structural-functional materials and components for application in marine observation and exploration platform

与航空、航天对结构减重的要求一致，深海装备的结构减重效益明显，减重后可增大海洋探测装备的航行敏捷度、减少浮力材料用量、降低能源消耗、提升装备作业周期。结构减重设计要求采用更高强度钛合金，然而结构材料普遍存在强度-韧性“倒置”现象，提升强度后往往导致韧性降低，引发脆性断裂并降低结构的可靠性及服役寿命，因此兼具高强度、高韧性的钛合金往往成为装备研制的瓶颈问题。美国 Limiting Factor 全海深载人潜水器在 2019 年完成了海试，其载人舱一反常态地选择搭载 2 人而非以往 3 人的设计方案，同时其载人舱采用了 800 MPa Ti-6Al-4V 钛合金。“十三五”期间，中国科学院金属研究所（以下简称“金属所”）自主研发了 950 MPa 级别高强韧钛合金，组建载人舱技术攻关“国家队”，研制了国际上首个载 3 人全海深钛合金球舱，使“奋斗者”号深海载人潜水器在 2020 年创造了 10 909 m 的我国载人深潜纪录。自 2021 年起，“奋斗者”号开展了系列常规科考作业，使我国成为国际上万米深潜次数和人数最多的国家。

1.2 高分子材料和复合材料实现耐压应用

由于无机非金属材料因韧性较低难以满足耐压结构的可靠性要求，本文中涉及的非金属结构材料限于承载的高分子复合材料，以结构承载为主、兼顾透光功能特性的材料，主要是高分子透明材料。

（1）高分子复合材料。纤维增强树脂基复合材料以其高比强度、高比模量、耐腐蚀、提供静浮力等特性，成为深海轻量化耐压舱体的候选材料之一。2002 年，美国千米级潜水器 Deep Flight I 采用玻璃纤维/环氧树脂复合材料制备了耐压壳体[3]。近期，中国科学院空间应用中心采用纤维增强树脂基复合材料制备了全海深轻量化复合材料耐压舱体，较 Ti-6Al-4V 钛合金结构减重 20% 以上。

（2）高分子透明材料。聚甲基丙烯酸甲酯（有机玻璃）高分子透明材料具有密度小、透明度高等物理特性。在力学性能方面，有机玻璃表现出应变速率强化、高应变速率脆化等特征，在准静态载荷作用下呈现延性破坏，高速动态作用下表现出明显的脆性断裂[4]。基于以上的物理学和力学特征，有机玻璃在低应变载荷下的水下透明耐压结构领域得到了广泛应用[5]。20 世纪 30 年代开始，美国的载人潜水器观察窗即开始采用有机玻璃，近 100 年来，国际上主流的载人潜水器观察窗一直采用有机玻璃的主导方案。基于对大作业视野的追求，国外研制的 Deep Rover、Triton 3300/3 系列载人潜水器的载人舱体也采用有机玻璃。受有机玻璃材料特性及工艺制备水平的制约，目前有机玻璃载人耐压舱体下潜深度一般不超过 2 000 m。

1.3 结构功能一体化材料发展迅速

（1）轻量化固体浮力材料。深海装备用固体浮力材料是为深海装备提供必要浮力的核心材料，主要由空心玻璃微球与树脂基材通过热固化成型制备。浮力材料的抗水压强度（与水深有关）和密度的综合匹配是其核心的性能指标。美国研制的浮力材料密度为 0.40—0.73 g/cm^3，应用水深 2 000—11 000 m，其中密度为 0.56 g/cm^3 能用于 7 000 m 水深[6]，被我国“蛟龙号”载人潜水器所采用。我国固体浮力材料在早期依靠进口，成为深海装备的“卡脖子”材料技术。“十二五”期间，中国科学院理化技术研究所（以下简称“理化所”）自主研制的固体浮力材料模块在南海进行了 155 天的海试试验，样品吸水率小于 1%，满足使用要求，并为“深海勇士”号 4 500 m 载人潜水器提供了密度为 0.54 g/cm^3 的浮力材料。“十三五”期间，理化所研制了新型空心玻璃微球和树脂基体，为“奋斗者”号研制并提供了密度为 0.69 g/cm^3 的浮力材料。目前我国已基本实现了覆盖全海深应用的密度 0.40—0.70 g/cm^3 浮力材料的自主可控保障，浮力材料性能与国际先进水平相当。

（2）照明材料。透明陶瓷具有优异的光学、力学和热学特性，在高温高压可视化窗口、高功率密

度固态照明和固体激光器等光学和光子学领域都受到青睐。近年来，在我国海洋光学探测需求迅速增长的背景下，石榴石透明陶瓷在深海光学窗口和照明领域的应用技术研究取得了一定进展[7]。在深海光学方面，中国科学院上海硅酸盐研究所攻克了复杂形状透明陶瓷的成型和致密化关键技术，研制出直径 40—120 mm 系列通光口径的半球形 $Y_3Al_5O_{12}$ 透明陶瓷，成功用于深海视频采集系统、海洋照明和光通信装备；在光子学应用方面，研究人员围绕稀土掺杂石榴石透明陶瓷的能带工程和微观组织结构调控开展了系统研究，作为新型光转换材料用于深海高功率 LED 和静态激光照明装置。

（3）密封、润滑材料。① 深海密封材料。目前深海耐压结构主要采用橡胶密封，但橡胶材料存在长期使用老化、温度适应性差和易磨损等密封隐患。与橡胶相比，金属密封具有更加优异的耐久性、温度适应性和耐磨性，例如铜、铝密封等，但此类金属易发生自身腐蚀和接触电化学腐蚀，不适于海洋环境应用。近年来，具有低模超弹、可形状自回复、耐腐蚀、耐磨损特征的钛镍形状记忆合金成为备受关注的新型类橡胶金属密封材料。金属所设计了钛镍合金多种密封结构，通过了相应的耐压考核试验及搭载海试试验，率先验证了钛镍合金在深海密封应用的可行性，目前已应用于万米水下滑翔机浮力调节系统和深海工艺孔的密封结构。②深海润滑材料。深海装备机械部件服役过程中摩擦磨损与海洋腐蚀耦合作用严重影响装备的可靠性和服役寿命。例如，深海高端柱塞液压泵的核心液压元件（关键摩擦副）表现出显著的摩擦腐蚀失效，目前主要以热喷涂 WC-Co-Ni_3Cr_2 为防护润滑涂层，但由于防护涂层存在致密性低、腐蚀通道多、易磨损等“先天缺陷”，难以满足深海装备长期稳定服役需求[8]。中国科学院宁波材料技术与工程研究所以深海柱塞泵关键摩擦副为应用目标，利用磁控溅射制备了兼具高硬度、减摩耐磨、耐蚀等特性的碳基涂层，初步获得了良好的试验及应用效果。

2 海洋观探测新材料技术发展趋势及挑战

海洋观测探测是高投入的领域，未来对观测、认知需求最多的仍是上层水体。对这类观测探测作业，装备成本控制是决定该领域能否快速发展的关键因素。可携带的有限能源仍然要求采用像钛合金和纤维增强高分子复合材料等轻质高强材料制造装备的主体耐压结构，因为这类材料的用量最大，降低装备总体成本的潜力也更大。纤维增强高分子复合材料成本比钛合金更高，近中期降低成本的空间较小。这类需求有望牵引低成本钛合金相关技术的发展，如返回料电子束熔炼技术、短流程制备工艺、氢化法粉末制备技术、近净成形技术、针对我国钛矿资源特色的合金成分设计技术。

海洋观测探测装备和技术的另一个重要发展趋势是大型化、大深度、长周期、全海域、多功能。马来西亚 MH370 客机失踪原因至今扑朔迷离，充分说明全海域大深度探测需求的重要性和技术难度。这类探测、作业装备是海洋强国建设的核心内容，对材料的主要性能、大规格制备、长寿命服役、宽温域适应性、多功能特性等提出了更高的总体要求，但不同类型的海洋工程新材料的差异明显，具体发展趋势和技术挑战也不尽相同。下面对这类材料需求进行简要讨论。

2.1 高强韧钛合金需突破大规格制备技术和高鲁棒性焊接技术

以往我国高性能钛合金的研发及应用主要围绕航空、航天两大领域，钛合金的材料体系、性能及制造技术均以满足航空、航天要求为主。而海洋服役环境迥异于航空航天，对钛合金材料性能及制造技术具有特色鲜明的要求，结合海洋观测探测技术的发展趋势，目前制约我国未来海洋装备的钛合金材料瓶颈问题主要体现在 3 个方面：① 高强韧钛合金缺乏系统

化、规模化应用。高强韧钛合金应用虽然可以带来显著的减重效益，但受制于制备技术难度、配套的工艺及规模应用成本等综合因素，尚未在我国深海装备上实现系统化、规模化应用。“奋斗者”号载人舱是高强韧钛合金在深海装备核心部件上的典型应用，我国在国际上率先突破的领先技术只有通过发挥“以点带面”的引领作用才能产生更大效应。② 缺乏宽幅超厚钛合金板材制备能力，制约海洋装备的大型化、整体化建造。海洋装备大型化、整体化建造对结构材料的规格尺寸具有较高要求。以钢为例，大潜深装备采用的钢板宽度可超过 4 m、厚度可达 200 mm，单张板材质量达到 20 t。“十三五”期间，我国研制了宽度 3 m、厚度 120 mm、质量约 8 t 的钛合金板材，应用于“奋斗者”号潜水器。然而，我国目前尚未突破与海洋用钢规格相当的宽幅超厚钛合金板材制备技术，成为海洋工程“钛替代钢”过程中的关键技术瓶颈之一。③ 焊接技术及配套装备无法满足深海大型钛合金耐压壳体建造需求。焊接是制造深海大型钛合金耐压壳体必不可少的工艺方法，通常包括气体保护窄间隙焊接、真空高能束如电子束焊接。对于制造直径 3 m、厚度 50 mm 的大型钛合金耐压壳体，采用逐层堆积的窄间隙焊接施工周期漫长，单个环缝焊接花费数月。真空电子束焊接效率大幅度提升，但对焊接真空环境要求苛刻，目前超大规格结构采用真空电子束焊接工程化实施难度极高，将成为未来制约超大规格钛合金耐压结构制造的另一项瓶颈技术。

2.2 非金属结构材料需进一步发展缺陷控制技术

（1）有机玻璃。在观测视角方面，相比于金属耐压壳体，有机玻璃壳体具有明显的视角优势，但其黏弹性力学特征和缺陷敏感性对结构设计、大尺度部件制备均提出了挑战。① 蠕变和延迟恢复。有机玻璃兼具弹性和黏性形变特征，表现为受力后发生随时间的蠕变行为，卸载后则发生延迟恢复。蠕变和延迟恢复特性给有机玻璃耐压部件的长期、往复使用带来了技术挑战。② 大尺寸有机玻璃缺陷控制。有机玻璃的断裂韧性较低，−40°C—40°C 温度范围内其断裂韧性在 1.45—2.90 MPa · $m^{1/2}$ 之间[4]，制造工艺缺陷（微裂纹、气孔等）对有机玻璃的承载能力具有显著影响，增加了大尺寸有机玻璃耐压壳体的制造难度。基于有机玻璃的黏弹性力学特征及缺陷敏感性，其作为耐压壳体，在结构设计、寿命预测方法及大尺寸部件缺陷控制等技术方面有待进一步发展。

（2）高分子复合材料。纤维增强树脂基复合材料耐压舱体由内胆/承力层/防水层多种材料复合而成，舱体在长期服役过程中多层材料界面应力演化，以及树脂基体防水、抗冲击性能是下一步关注、提升的重点。

2.3 结构功能一体化材料有待强化多功能特性

（1）轻量化浮力材料。我国深潜浮力材料长期以来以跟踪研究为主，近 10 年来，我国实现了从依赖进口到部分型号国产化，但还缺乏系统的基础研究积淀，一定程度上存在知其然、不知其所以然的问题，制约了谱系化浮力材料向更高水平迈进。此外，在浮力材料多功能化方面，国际上已开展兼具声学、电磁、绝热功能的浮力材料研制，而国内目前基本处于空白状态。

（2）照明材料。面向深海光学探测需求，提高透明陶瓷尺寸、光效和结构稳定性是关键。透明陶瓷尺寸局限性对光电探测效率和载荷空间形成了明显制约，提升深海光电系统高效运行的关键在于发展大尺度和复杂形状石榴石透明陶瓷的制造技术。稀土掺杂石榴石荧光陶瓷材料在高功率密度激光辐照下存在光效骤降和结构失效的潜在问题，提升其在极端服役条件下的光效和热管理水平是透明陶瓷光子学应用研究领域的重要目标。

（3）密封、润滑材料。① 深海密封材料。海洋装备长寿命发展趋势，对密封材料及密封件结构设计均提出了更高要求。类橡胶钛镍形状记忆合金作为密

封材料的综合优势已经得到初步验证，但相关的应用技术研究还处于起步阶段，特别是在密封材料的抗蠕变性能及密封结构设计方面还需开展系统工作，以适应海洋装备多种结构密封需求。② 深海润滑材料。传统热喷涂润滑涂层在机械磨损和海洋腐蚀耦合作用下表现出显著的摩擦腐蚀失效，是制约深海柱塞液压泵等动力装备长期服役的瓶颈。磁控溅射碳基涂层兼具高硬度、减摩耐磨、耐蚀等特性，已在航空航天、汽车等领域获得应用，但其在腐蚀、摩擦以及摩擦-腐蚀交互等作用下适用性尚未得到系统验证，相关材料在海洋工程方面的设计准则、服役评价方法在国内基本属空白。

3 发展建议

装备制造，材料先行。材料作为装备的基石，其规划、布局及研发、生产直接关乎未来海洋核心装备的有无和自主可控水平。基于对海洋探测观测新材料的应用现状、发展趋势及挑战的分析，提出 3 点建议。

（1）加强顶层设计，以国家重大任务为牵引，带动系列新材料技术整体升级跨代。未来更大结构、更长寿命、更高安全性的海洋观测探测装备应由国家和行业统一规划，组织国内材料领域的战略力量聚焦重大需求、重点攻关，快速突破技术瓶颈，提供系列化海洋关键材料技术供给，协助骨干企业实现大规格结构材料生产。

（2）动员社会力量参与，多措并举，有效发挥市场机制作用，建立海洋材料持续发展长效机制。对于需求量大的上层水体观测探测装备，鼓励中小企业和高校参与研发，以社会力量解决材料“多、小、散、杂”特点易导致的供应短板，促进海洋新材料产业健康发展。

（3）不断凝练材料领域与海洋环境交叉的基础科学问题，前瞻部署研究项目。关注并力图解决海洋环境下关键材料的主要基础科学问题，如：钛合金高能束焊缝增韧原理；钛合金氢脆与应力腐蚀开裂倾向的关系；耐腐蚀高韧性 MAX 相陶瓷制备方法；低成本浮力材料成分体系。只有这样才能真正做到材料先行，尽量消除可能迟滞新一代海洋装备发展的材料短板，为海洋强国战略奠定厚实的物质基础。

致谢 中国科学院理化技术研究所张敬杰、中国科学院上海硅酸盐研究所周国红、中国科学院宁波材料技术与工程研究所柯培玲、中国科学院空间应用中心王功、中国船舶科学研究中心姜旭胤对本文进行了有益的讨论，在此一并致谢。

参考文献

1 章梓雄. 建立海洋强国必须优先发展海洋科技与工程. 中国科学院院刊, 2004, 19(6): 417-419.
Zhang Z X. The preferential development of ocean technology and engineering is key to the construction of strong maritime country. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2004, 19(6): 417-419. (in Chinese)

2 雷家峰, 马英杰, 杨锐, 等. 全海深载人潜水器载人球壳的选材及制造技术. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2016, 8(2): 179-184.
Lei J F, Ma Y J, Yang R, et al. Material and fabrication of the personnel hull for full ocean depth submersible. Journal of Engineering Studies, 2016, 8(2): 179-184. (in Chinese)

3 Zhang E, Zhu X L, Jing T, et al. Research status and development trend of pressure resistant structure of deep submersibles. Journal of Ship Mechanics, 2021, 25(10): 1427-1437.

4 王元清, 孙洲, 王综轶, 等. 结构有机玻璃的工程应用与研究进展. 工程力学, 2022, 39(4): 1-14.
Wang Y Q, Sun Z, Wang Z Y, et al. Engineering application and research progress of structural acrylic. Engineering Mechanics, 2022, 39(4): 1-14. (in Chinese)

5 刘帅, 叶聪, 汤国伟, 等. 国内首型全通透载客潜水器的设计与研制. 中国造船, 2019, 60(3): 113-120.
Liu S, Ye C, Tang G W, et al. Design and development of the first acrylic-hulled submersible in China. Shipbuilding of

China, 2019, 60(3): 113-120. (in Chinese)

6 王平, 严开祺, 潘顺龙, 等. 深水固体浮力材料研究进展. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2016, 8(2): 223-229.
Wang P, Yan K Q, Pan S L, et al. Research development on solid buoyancy material for deep-sea application. Journal of Engineering Studies, 2016, 8(2): 223-229. (in Chinese)

7 郑哲涵, 张翔, 徐小科, 等. 基于Ce^{3+}:YAG透明陶瓷的大功率LED和LD照明原型器件的发光性能：厚度和表面粗糙度的影响. 发光学报, 2020, 41(11): 1411-1420.
Zheng Z H, Zhang X, Xu X K, et al. Thickness and surface roughness effect on lighting performance of Ce^{3+}:YAG transparent ceramics based high power LED and LD lighting prototype devices. Chinese Journal of Luminescence, 2020, 41(11): 1411-1420. (in Chinese)

8 Wood R J K. Marine wear and tribocorrosion. Wear, 2017, 376-377: 893-910.

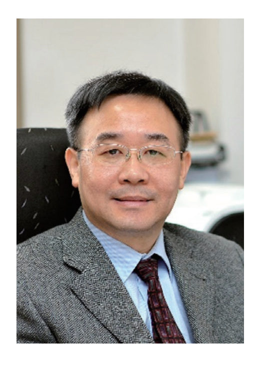
Perspective on Key Materials for Marine Observation and Exploration Platform

YANG Rui[1*] MA Yingjie[1] CHENG Shijing[2]

（1 Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
2 Bureau of Major R&D Programs, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, China）

Abstract An overview is presented of the status of pressure-resistant structural materials and structural functional materials for application in marine observation and exploration platform. The key roles of new materials in facilitating high performance marine equipment are highlighted. The most in-demand observation tasks concern the upper ocean and low cost materials must be developed to manufacture affordable equipment. For deep ocean observations, future challenges are identified for developing next-generation high strength titanium alloys, buoyancy materials, lighting materials, and lubricating and sealing materials. Recommendations are proposed regarding project organization and research paradigm update, and emphasis is placed upon identifying and solving scientific problems underlying the technical advance of the materials.

Keywords deep-sea exploration, pressure-resistant structural materials, buoyancy material, lighting materials, lubricating and sealing materials



杨 锐 中国科学院金属研究所钛合金研究部主任，上海科技大学智造系统工程中心主任。曾担任“奋斗者”号潜水器钛合金载人舱项目负责人。E-mail: ryang@imr.ac.cn

YANG Rui Head of the Titanium Alloys Division of the Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences since 1997, and Director of the Center for Adaptive System Engineering, Shanghai Tech University since 2019. He headed the titanium alloy personnel sphere for “Fendouzhe” manned submersible project (2016–2020). E-mail: ryang@imr.ac.cn

■责任编辑：张帆

*Corresponding author